

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.01.004

## 铝锂合金混合酸阳极氧化及无铬封闭研究

苏奥<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 陈慧<sup>2\*</sup>

(1. 河北机电职业技术学院 材料与建筑工程系, 河北 邢台 054000; 2. 天津理工大学 化学化工学院, 天津 300384)

**摘要:** 为有效提高铝锂合金的耐蚀性能, 采用混合酸电解液(硫酸与柠檬酸的混合溶液)进行阳极氧化, 然后对阳极氧化膜进行无铬封闭处理, 并对阳极氧化膜的微观形貌、表面成分、厚度和耐蚀性能进行了分析表征。结果表明: 混合酸阳极氧化后铝锂合金表面形成了均匀多孔的阳极氧化膜, 主要含有Al、S和O元素, 厚度为12.8 μm, 其耐蚀性能好于铝锂合金。沸水封闭、锆盐封闭、镍盐封闭和铈盐封闭对阳极氧化膜的厚度几乎没有影响, 但封闭后阳极氧化膜表面平整度和致密性改善, 耐蚀性能明显提高。铈盐封闭过程中同时生成水合氧化铝、铈氢氧化物和铈氧化物, 更好的填充覆盖了孔洞, 封闭效果好于沸水封闭、锆盐封闭和镍盐封闭, 因此铈盐封闭阳极氧化膜表面更平整致密, 抵御腐蚀能力增强, 电荷转移电阻较铝锂合金提高了超过一个数量级, 腐蚀失重仅为铝锂合金的1/9, 可以显著提高铝锂合金的耐蚀性能。

**关键词:** 铝锂合金; 混合酸阳极氧化; 耐蚀性能; 无铬封闭

**中图分类号:** TQ153.6      **文献标识码:** A

## Study on Mixed Acid Anodic Oxidation and Chromium Free Sealing of Aluminium Lithium Alloy

SU Ao<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, CHEN Hui<sup>2\*</sup>

(1. Department of Materials and Building Engineering, Hebei Institute of Mechanical and Electrical Technology, Xingtai 054000, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** Aluminium lithium alloy was anodized in mixed acid electrolyte (sulfuric acid and citric acid mixed solution) and then treated with chromium-free sealing in order to effectively improve its corrosion resistance. The micromorphology and surface components of anodic oxide films were characterized and analyzed, and the thickness and corrosion resistance were also tested. The micromorphology, surface composition, thickness and corrosion resistance of anodic oxide film were analyzed and characterized. The results show that a uniform porous anodic oxide film is formed on the surface of aluminium lithium alloy after anodized in mixed acid electrolyte, which mainly contains Al, S and O elements, and the thickness is 12.8 μm. The corrosion resistance of anodic oxide film is better than that of aluminium lithium alloy. Boiling water sealing, zirconium salt sealing, nickel salt sealing and cerium salt sealing have little effect on the thickness of anodic oxide film, but the surface flatness and compactness of

收稿日期: 2021-08-28

修回日期: 2021-11-03

作者简介: 苏奥(1988—), 硕士, 讲师, 主要研究方向: 金属材料及制备工艺、分析检测技术等, email: suao0926@163.com。

通信作者: 陈慧, email: chen\_edu1111@126.com。

基金项目: 2019年河北省邢台市科技支撑计划项目(2019ZC045)

the anodic oxide film after sealing were improved, and the corrosion resistance was improved obviously. Hydrated alumina, cerium hydroxide and cerium oxide simultaneously generated during the process of cerium salt sealing, which could better fill and cover the holes, and the sealing effect was better than that of boiling water sealing, zirconium salt sealing and nickel salt sealing. Therefore, the surface of cerium salt sealed anodic oxide film is more smooth and compact and the corrosion resistance is enhanced. The charge transfer resistance is more than one order of magnitude higher than that of aluminium lithium alloy, and the corrosion weight loss is only 1/9 of that of aluminium lithium alloy, which can significantly improve the corrosion resistance of aluminium lithium alloy.

**Keywords:** aluminium lithium alloy; anodized with mixed acid electrolyte; corrosion resistance; chromium-free sealing

铝锂合金凭借低密度、较高强度、较好的延展性及抗疲劳性,可以应用在航空航天领域<sup>[1-3]</sup>,使航天器构件的重量减轻,从而增加有效载荷。然而,铝锂合金表面容易形成一层疏松多孔的天然氧化膜,不具有保护作用,反而表现出较强的点蚀倾向,无疑加重了铝锂合金腐蚀敏感性。鉴于此,通过表面处理提高铝锂合金的耐蚀性能具有重要意义。

近年来研究发现,阳极氧化也适用于铝锂合金表面处理。刘湘伟等<sup>[4]</sup>采用常规硫酸阳极氧化对2195铝锂合金进行表面处理,得到较佳阳极氧化工艺参数使2195铝锂合金的耐蚀性能明显提高。肖金涛等<sup>[5]</sup>也采用常规硫酸阳极氧化对2195铝锂合金进行表面处理,并优化了硫酸浓度、氧化时间和电压,为提高铝锂合金表面阳极氧化膜的耐蚀性能提供了参考。颜鹏等<sup>[6]</sup>在2198和5A90两种铝锂合金硫酸阳极氧化过程中施加脉冲电流,发现脉冲电流促进形成较厚的阳极氧化膜,表现出良好耐蚀性能。马宗耀等<sup>[7]</sup>在2090铝锂合金硫酸阳极氧化过程中添加硫酸镍,发现硫酸镍对提高阳极氧化膜耐蚀性能具有一定效果。韩保红等<sup>[8]</sup>研究了不同前处理工艺对铝锂合金表面硫酸阳极氧化膜耐蚀性能的影响,发现碱腐蚀工艺和三酸脱氧处理工艺对阳极氧化膜耐蚀性能影响不大。王邈<sup>[9]</sup>探讨了铬酸阳极氧化对铝锂合金的适用性,发现铬酸阳极氧化对铝锂合金不太适用。

混合酸阳极氧化是在常规硫酸阳极氧化基础上发展而来,混合酸电解液对阳极氧化膜的腐蚀溶解程度较硫酸电解液减弱,能够有效提高阳极氧化膜的致密度和性能。目前很少见铝锂合金混合酸阳极氧化的报道,开展这方面研究可以为提高铝锂合金

的耐蚀性能提供新思路。

因此,本文选用2195铝锂合金作为研究对象,采用混合酸电解液(硫酸与柠檬酸的混合溶液)进行阳极氧化,然后对阳极氧化膜无铬封闭处理,以期有效提高铝锂合金的耐蚀性能。

## 1 实验

### 1.1 铝锂合金预处理

实验采用3 mm厚的2195铝锂合金板材,化学成分为:Cu 4.00%、Li 1.00%、Mg 0.40%、Ag 0.27%、Zr 0.11%、Al余量。预处理流程如下:打磨→抛光→丙酮中超声波清洗→清水冲洗→60℃的氢氧化钠溶液(50 g/L)中浸泡10 min→体积分数20%的硝酸溶液中浸泡40 s→去离子水冲洗→干燥。

### 1.2 混合酸阳极氧化

阳极氧化采用混合酸电解液:18 mL·L<sup>-1</sup>浓硫酸(98%)和80 g·L<sup>-1</sup>一水柠檬酸。柠檬酸属于有机弱酸,添加柠檬酸作用是减弱浓硫酸对阳极氧化膜的腐蚀溶解作用,有利于阳极氧化膜较均匀溶解,从而提高成膜效率和阳极氧化膜均匀性。采用恒温水浴锅控制电解液温度在24℃左右,混合酸阳极氧化工艺参数为:阳极电流密度2 A·dm<sup>-2</sup>,氧化时间45 min。

### 1.3 无铬封闭处理

铝锂合金混合酸阳极氧化后,分别进行沸水封闭、锆盐封闭、镍盐封闭和铈盐封闭,封闭液成分及工艺参数见表1。以下将未封闭阳极氧化膜作为对照,沸水封闭、锆盐封闭、镍盐封闭和铈盐封闭后的阳极氧化膜分别称为沸水封闭阳极氧化膜、锆盐封闭阳极氧化膜、镍盐封闭阳极氧化膜以及铈盐封闭阳极氧化膜。

表1 封闭液成分及工艺参数

Tab.1 Composition of sealing solution and process parameters

封闭方式	封闭液成分及浓度		工艺参数		
			电解电流密度/(mA·dm <sup>2</sup> )	温度/°C	时间/min
沸水封闭	去离子水		—	100	30
锆盐封闭	<i>c</i> (氟锆酸)/(g·L <sup>-1</sup> )	40	—	50	30
镍盐封闭	<i>c</i> (硫酸镍)/(g·L <sup>-1</sup> )	5	—	80	30
	<i>c</i> (硼酸)/(g·L <sup>-1</sup> )	3			
	<i>c</i> (氟化钠)/(g·L <sup>-1</sup> )	0.8			
铈盐封闭	<i>c</i> (硝酸铈)/(g·L <sup>-1</sup> )	4.5	10	60	30
	<i>c</i> (过氧化氢(30%))/(mL·L <sup>-1</sup> )	9			

1.4 微观形貌表征与性能测试

采用MERLIN Compact型扫描电镜表征阳极氧化膜的微观形貌,并用配备的Oxford型能谱仪进行面扫描,分析阳极氧化膜表面成分。

采用TT260型测厚仪在阳极氧化膜表面选3个点(呈十字交叉形)测定厚度,结果取平均值,并分析误差。

采用PARSTAT 2273型电化学工作站测试电化学阻抗谱,以待测阳极氧化膜作为工作电极、铂片作为辅助电极、饱和甘汞电极作为参比电极。配制质量分数3.5%的氯化钠溶液作为腐蚀介质,待开路电位稳定后开始测试,扫描频率范围10<sup>5</sup>~10<sup>2</sup> Hz。采用ZSimpWin软件拟合测试数据得到电荷转移电阻,对阳极氧化膜的耐蚀性能进行评价。

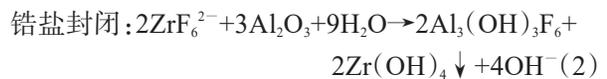
采用SK-60M型盐雾箱依照GB/T 10125—2012进行乙酸盐雾实验,实验周期为96 h。达到设定时间后取出试样,清理腐蚀产物并干燥后计算腐蚀失重。为了降低误差,设置3个平行试样,腐蚀失重计算结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 表面成分

图1所示为不同阳极氧化膜表面元素分布,表2列出不同阳极氧化膜中各元素质量分数。由表2可知,未封闭阳极氧化膜主要含有Al、S和O元素,沸水封闭阳极氧化膜的元素组成与未封闭阳极氧化膜相同,但各元素质量分数有一定差异。锆盐封闭阳极氧化膜、镍盐封闭阳极氧化膜和铈盐封闭阳极氧化膜的元素组成与沸水封闭阳极氧化膜不同,除了Al、S和O元素,分别检测到Zr、F、Ni和Ce元素,质量分数分别为0.75%、19.06%、5.35%和2.89%。

沸水封闭机理是氧化铝水合反应<sup>[10]</sup>,即非晶态氧化铝转变成水合氧化铝,反应方程式如式(1)所示,此过程中未引入新元素,因此沸水封闭阳极氧化膜的元素组成与未封闭阳极氧化膜相同。锆盐封闭机理、镍盐封闭机理和铈盐封闭机理都比沸水封闭机理复杂<sup>[11-14]</sup>,除了氧化铝水合反应(式(1)),还发生如下反应式(2)~式(5):



由上式可以看出过程中分别引入了Zr和F、Ni以及Ce元素。其中,锆盐封闭、镍盐封闭过程中分别生成锆氢氧化物、镍氢氧化物,铈盐封闭过程中除了生成铈氢氧化物,在电场作用下还生成铈氧化物。

2.2 微观形貌与厚度

图2所示为铝锂合金和不同阳极氧化膜的微观形貌。对比可知,在铝锂合金表面形成了均匀多孔、孔洞均一且排列紧密的阳极氧化膜,并且无铬封闭后阳极氧化膜的微观形貌明显不同。具体来说,沸水封闭阳极氧化膜表面出现不规则片状分层,比较粗糙,仍然存在一些孔洞。这是由于沸水封闭过程中生成的水合氧化铝沉积不均匀,导致阳极氧化膜的孔洞得不到较好封闭。锆盐封闭阳极氧化膜和镍盐封闭阳极氧化膜分别呈类似胞状形貌和网格状形貌,表面平整度较沸水封闭阳极氧化膜有所改善,虽然也存在孔洞,但是数量减少。这是由于锆盐封闭和镍盐封闭过程中同时生成水合氧化铝、锆氢氧化物或镍氢氧化物,都能沉积在孔洞中使其较好封

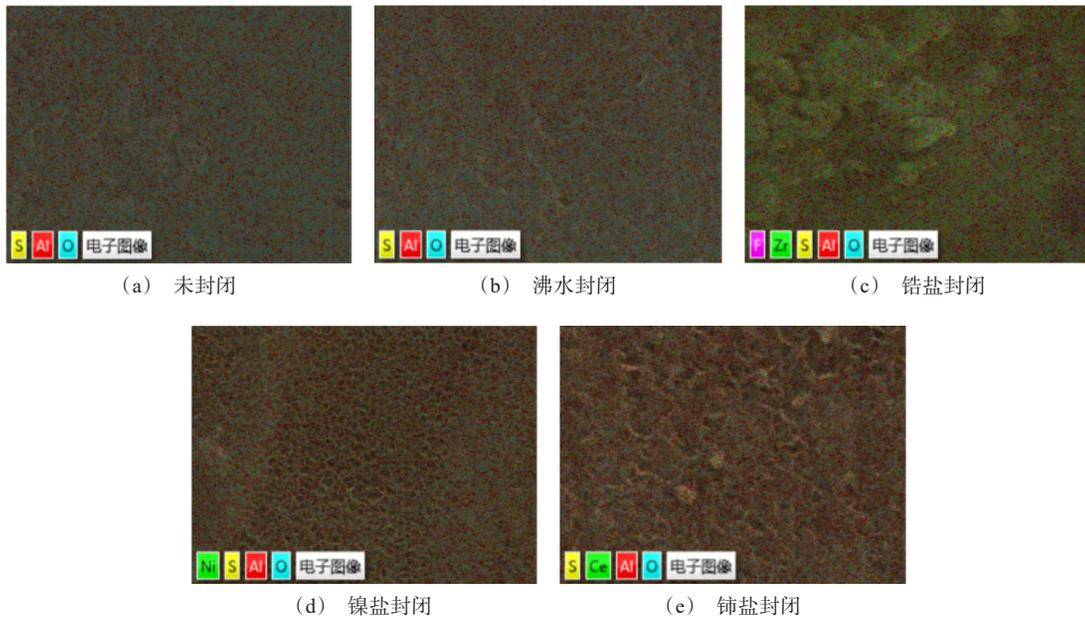


图1 不同阳极氧化膜表面元素分布

Fig.1 Distribution of elements on the surface of different anodic oxide films

表2 不同阳极氧化膜中各元素质量分数

Tab.2 Mass fraction of each element in different anodic oxide films

不同阳极氧化膜	元素质量分数/%						
	Al	S	O	Zr	F	Ni	Ce
未封闭	54.78	3.79	41.43	—	—	—	—
沸水封闭	41.20	3.98	54.82	—	—	—	—
锆盐封闭	27.23	5.28	47.68	0.75	19.06	—	—
镍盐封闭	39.24	3.70	51.71	—	—	5.35	—
铈盐封闭	44.45	4.04	48.62	—	—	—	2.89

闭。铈盐封闭阳极氧化膜表面最平整致密,孔洞很少。这是由于铈盐封闭过程中既生成水合氧化铝和铈氢氧化物沉积在孔洞中起到较好的封闭作用,还生成含铈转化膜覆盖在阳极氧化膜表面,封闭孔洞的同时也可以改善阳极氧化膜表面平整度和致密性。

图3所示为不同阳极氧化膜的厚度。可知未封闭阳极氧化膜的厚度为12.8  $\mu\text{m}$ ,沸水封闭阳极氧化膜、锆盐封闭阳极氧化膜、镍盐封闭阳极氧化膜和铈盐封闭阳极氧化膜的厚度几乎未变化,分别为12.9  $\mu\text{m}$ 、12.9  $\mu\text{m}$ 、13.0  $\mu\text{m}$ 和13.0  $\mu\text{m}$ 。因此,可以忽略厚度对阳极氧化膜耐蚀性能的影响。结合沸水封闭、锆盐封闭、镍盐封闭和铈盐封闭机理分析,无论生成水合氧化铝,还是锆氢氧化物、镍氢氧化物、铈

氢氧化物,主要沉积在孔洞中对阳极氧化膜的厚度几乎没有影响。虽然铈盐封闭过程中生成含铈转化膜覆盖在阳极氧化膜表面,但是该膜层很薄,对阳极氧化膜的厚度影响很小。

### 2.3 耐蚀性能

图4所示为铝锂合金和不同阳极氧化膜的电化学阻抗谱。铝锂合金和不同阳极氧化膜的奈奎斯特图都只有一个容抗弧,并且无铬封闭后阳极氧化膜的容抗弧形状未发生变化,但是容抗弧半径增大,说明无铬封闭后阳极氧化膜的耐蚀性能显著提高。具体来说,沸水封闭阳极氧化膜的容抗弧半径较小,其耐蚀性能相对较差。这是由于水合氧化铝沉积不均匀,导致沸水封闭阳极氧化膜的孔洞得不到较好封闭,仍有部分孔洞呈张开状态会逐渐成为腐蚀通道。锆盐封闭阳极氧化膜和镍盐封闭阳极氧化膜的容抗弧半径较沸水封闭阳极氧化膜增大,说明耐蚀性能提高。锆盐封闭和镍盐封闭过程中同时生成水合氧化铝、锆氢氧化物或镍氢氧化物,较均匀沉积使孔洞得到较好封闭,锆盐封闭阳极氧化膜和镍盐封闭阳极氧化膜的平整度改善,腐蚀介质渗透扩散的阻力增大。铈盐封闭阳极氧化膜的容抗弧半径最大,其耐蚀性能最好。这是由于铈盐封闭过程中同时生成水合氧化铝和铈氢氧化物沉积在孔洞中阻挡了腐蚀介质侵入,另外还生成含铈转化膜覆盖在阳

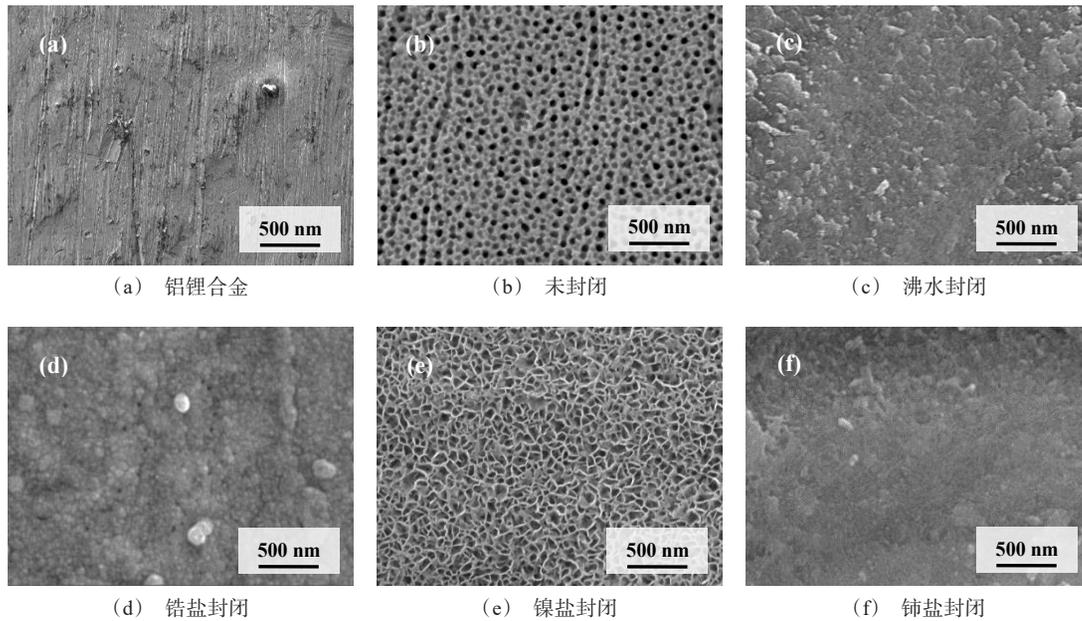


图2 铝锂合金和不同阳极氧化膜的微观形貌

Fig.2 Micromorphology of aluminium lithium alloy and different anodic oxide films

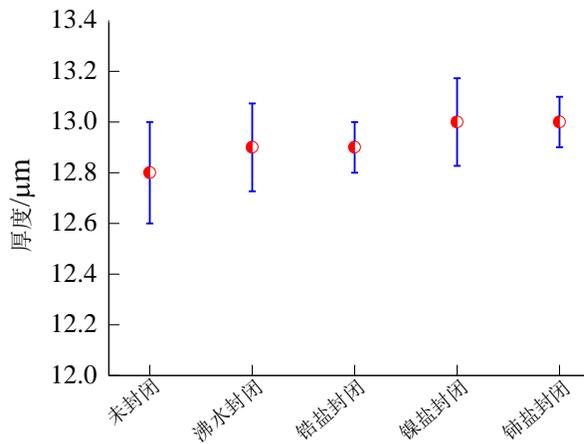


图3 不同阳极氧化膜的厚度

Fig.3 Thickness of different anodic oxide films

极氧化膜表面同样起到封闭孔洞的作用,增大了腐蚀阻力。

图5所示为电化学阻抗谱图拟合采用的等效电路,表3列出拟合结果。可以看出,未封闭阳极氧化膜的电荷转移电阻较铝锂合金明显增大,但是低于沸水封闭阳极氧化膜、铬盐封闭阳极氧化膜、镍盐封闭阳极氧化膜和镉盐封闭阳极氧化膜。无铬封闭后的阳极氧化膜中,沸水封闭阳极氧化膜的电荷转移电阻相对较小,铬盐封闭阳极氧化膜和镍盐封闭阳极氧化膜的电荷转移电阻接近,而镉盐封闭阳极氧

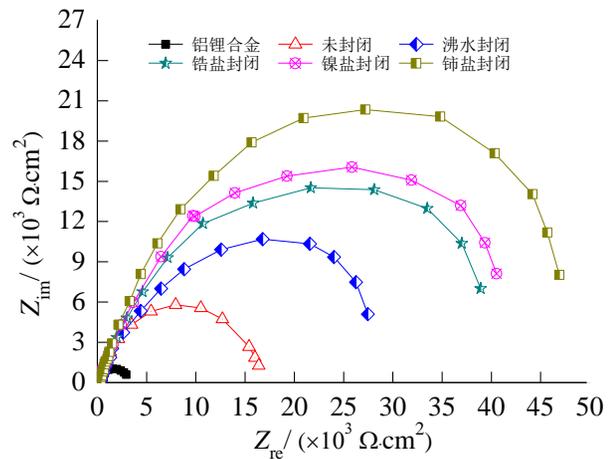


图4 铝锂合金和不同阳极氧化膜的电化学阻抗谱

Fig.4 Electrochemical impedance spectroscopy of aluminium lithium alloy and different anodic oxide films

化膜的电荷转移电阻最大。研究证实,电荷转移电阻能够评价膜层的耐蚀性能,越大说明膜层耐蚀性能越好<sup>[15-20]</sup>。由于沸水封闭阳极氧化膜的孔洞得不到较好填充,表面粗糙,不能有效阻挡腐蚀介质侵入,因此耐蚀性能较差。镉盐封闭阳极氧化膜表面更平整致密,与腐蚀介质接触面积最小,腐蚀程度最轻。另外,孔洞被较好封闭切断了腐蚀通道,有效阻挡了腐蚀介质侵入,使腐蚀阻力增大,因此其电荷转移电阻最大,耐蚀性能最好。

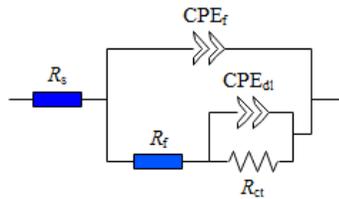


图5 拟合的等效电路

Fig.5 Equivalent circuit for fitting of electrochemical impedance spectrum

表3 电化学阻抗谱拟合结果

Tab.3 Electrochemical impedance spectrum fitting results

不同阳极氧化膜	电荷转移电阻/( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
铝锂合金	$1.42 \times 10^3$
未封闭	$7.91 \times 10^3$
沸水封闭	$1.36 \times 10^4$
锆盐封闭	$1.89 \times 10^4$
镍盐封闭	$1.93 \times 10^4$
铈盐封闭	$2.30 \times 10^4$

表4列出铝锂合金和不同阳极氧化膜的腐蚀失重。

表4 铝锂合金和不同阳极氧化膜的腐蚀失重

Tab.4 Corrosion weight loss of aluminium lithium alloy and different anodic oxide films

不同阳极氧化膜	腐蚀失重/( $\text{g} \cdot \text{m}^2$ )
铝锂合金	18.36
未封闭	9.41
沸水封闭	6.12
锆盐封闭	3.78
镍盐封闭	3.64
铈盐封闭	2.23

由表4可知,未封闭阳极氧化膜的腐蚀失重较铝锂合金降低了近1/2,证实了阳极氧化膜的耐蚀性能好于铝锂合金。与未封闭阳极氧化膜相比,沸水封闭阳极氧化膜、锆盐封闭阳极氧化膜、镍盐封闭阳极氧化膜和铈盐封闭阳极氧化膜的腐蚀失重都更低,这也证实无铬封闭后阳极氧化膜的耐蚀性能提高。由于沸水封闭阳极氧化膜表面粗糙,微孔和凹坑较多,与腐蚀介质接触面积大,容易侵入阳极氧化膜内部,导致其腐蚀程度相对严重。锆盐封闭阳极氧化膜和镍盐封闭阳极氧化膜表面平整度较沸水封闭阳极氧化膜改善,与腐蚀介质接触面积减少,对腐蚀介质的阻隔效果较好。另外,孔洞得到较好封闭切断了腐蚀通道,延长了腐蚀介质迁移路径,因此腐

蚀程度减轻,腐蚀失重降低。铈盐封闭阳极氧化膜表面最平整致密,微孔和凹坑更少,更好的阻隔腐蚀介质使腐蚀阻力更大,因此其腐蚀失重最低。

### 3 结论

(1)采用混合酸电解液进行阳极氧化在铝锂合金表面制备出均匀多孔的阳极氧化膜,其厚度为 $12.8 \mu\text{m}$ ,主要含有Al、S和O元素,耐蚀性能好于铝锂合金。经无铬封闭后阳极氧化膜的厚度基本不变,但表面成分不同,表面平整度和致密性改善,耐蚀性能明显提高。

(2)铈盐封闭效果好于沸水封闭、锆盐封闭和镍盐封闭,原因是铈盐封闭过程中同时生成水合氧化铝、铈氢氧化物和铈氧化物,更好的填充覆盖了孔洞,使阳极氧化膜表面更平整致密,抵御腐蚀能力增强。铈盐封闭后阳极氧化膜的电荷转移电阻较铝锂合金提高了超过一个数量级,腐蚀失重约为铝锂合金的1/9,可以显著提高铝锂合金的耐蚀性能。

### 参考文献

- [1] 吴国华,孙江伟,张亮,等.铝锂合金材料研究应用现状与展望[J].有色金属科学与工程,2019,10(2):31-46.  
Wu G H, Sun J W, Zhang L, et al. Current status and prospects of research and application of aluminum-lithium alloy[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2019, 10(2): 31-46 (in Chinese).
- [2] Paula L C D, Tokita S, Kadoi K, et al. Analysis of the 355 aluminium alloy microstructure for application in thixoforming[J]. Solid State Phenomena, 2019(285): 277-282.
- [3] Luo C G, Zhang Y H, Li J G. Microstructure and mechanical properties of tungsten inert gas weld joints of sprayed and cast aluminium-lithium alloy[J]. Materials, 2020, 13(17): 3787.
- [4] 刘湘伟,李劲风,张瑞丰,等.工艺参数对2195铝锂合金阳极氧化膜层腐蚀行为的影响[J].材料保护,2020,53(3):107-111.  
Liu X W, Li J F, Zhang R F, et al. Effect of process parameters on corrosion behavior of anodized film on 2195 Al-Li alloy[J]. Materials Protection, 2020, 53(3): 107-111 (in Chinese).
- [5] 肖金涛,陈妍,邢明秀,等.工艺参数对2195铝锂合金阳极氧化膜的耐蚀性影响[J].中国腐蚀与防护学报,2019,39(5):431-438.

- Xiao J T, Chen Y, Xing M X, et al. Effect of process parameters on corrosion resistance of anodizing film on 2195 Al-Li alloy[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2019, 39(5): 431-438 (in Chinese).
- [6] 颜鹏, 厉新明, 何林波, 等. 2198和5A90铝锂合金脉冲阳极氧化膜制备及耐蚀性[J]. *航空材料学报*, 2017, 37(2): 13-20.
- Yan P, Li X M, He L B, et al. Preparation and corrosion resistance of pulse-current anodic oxidation films of 2198 and 5A90 Al-Li alloys[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, 37(2): 13-20 (in Chinese).
- [7] 马宗耀, 谢发勤. 铝-锂合金阳极氧化及膜层性能的研究[J]. *电镀与环保*, 2008, 28(6): 31-34.
- Ma Z Y, Xie F Q. Study of anodizing Al-Li alloy and properties of the anodization film[J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2008, 28(6): 31-34 (in Chinese).
- [8] 韩保红, 张骐, 孙志华, 等. 前处理工艺对航空铝锂合金硫酸阳极氧化膜层性能影响[J]. *航空材料学报*, 2017, 37(5): 48-54.
- Han B H, Zhang Q, Sun Z H, et al. Effect of pretreatment process on properties of aerospace Al-Li alloy sulfuric acid anodic film[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, 37(5): 48-54 (in Chinese).
- [9] 王邈. 铝锂合金铬酸阳极化工艺适用性研究[J]. *上海涂料*, 2011, 49(8): 16-18.
- Wang M. Study on applicability of chromic acid anodizing process on aluminum lithium alloy[J]. *Shanghai Coatings*, 2011, 49(8): 16-18 (in Chinese).
- [10] Fujita M, Tanaka H, Muramatsu H, et al. 采用氢氧化锂提高铝合金氧化膜的耐腐蚀性能[J]. *国外内燃机*, 2015, 47(1): 58-62.
- Fujita M, Tanaka H, Muramatsu H, et al. Improvement of corrosion resistance of aluminum alloy oxide film by using lithium hydroxide[J]. *Foreign Internal Combustion Engine*, 2015, 47(1): 58-62 (in Chinese).
- [11] 朱鸿昌, 晏柳, 芦佳明, 等. 铝合金阳极氧化铬盐封闭研究[J]. *江西化工*, 2020(3): 68-71.
- Zhu H C, Yan L, Lu J M, et al. Sealing of aluminum alloy anodic using fluorozirconate[J]. *Jiangxi Chemical Industry*, 2020(3): 68-71 (in Chinese).
- [12] Won J, Jeong H C, Lee J H, et al. Physicochemical modification effect on homogeneously aligned liquid crystals based on the nickel oxide thin film[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2019, 19(10): 6139-6143.
- [13] 王英君, 刘洪雷, 王国军, 等. 新型高强稀土 Al-Zn-Mg-Cu-Sc 铝合金的阳极氧化及其抗腐蚀性能研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2020, 40(2): 131-138.
- Wang Y J, Liu H L, Wang G J, et al. Investigation of anodic film on a novel RE-containing Al-Alloy Al-Zn-Mg-Cu-Sc[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2020, 40(2): 131-138 (in Chinese).
- [14] 于美, 马荣豹, 刘建华, 等. 硝酸铈封闭对 2A12 铝合金己二酸-硫酸阳极氧化膜耐蚀性的影响[J]. *材料工程*, 2015, 43(1): 24-29.
- Yu M, Ma R B, Liu J H, et al. Effects of cerous nitrate sealing on corrosion resistance of adipic-sulfuric acid anodic oxide films on 2A12 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2015, 43(1): 24-29 (in Chinese).
- [15] Peng S, Xu J, Li Z Y, et al. Electrochemical noise analysis of cavitation erosion corrosion resistance of NbC nanocrystalline coating in a 3.5 wt.% NaCl solution[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021(415): 127133.
- [16] Shetty A R, Hegde A C. Magneto-electrodeposition of Ni-Mo-Cd alloy coating for improved corrosion resistance [J]. *Chemical Data Collections*, 2021(32): 100639.
- [17] 娄燕敏, 孙健, 夏法锋. 射流电沉积 Ni-SiC 纳米镀层的腐蚀行为研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2020, 43(3): 38-42.
- Lou Y M, Sun J, Xia F F. Corrosion behavior of Ni-SiC nanocoating deposited by jet electrodeposition[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2020, 43(3): 38-42 (in Chinese).
- [18] Kamalankirubakaran A M, Anderson A, Sarabanan K G, et al. Evaluation of corrosion resistance of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ thermal barrier coating using electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020(33): 902-905.
- [19] 李金宝, 周古昕, 杨润田, 等. 轧态 Mg-Gd-Y-Zr 合金显微组织及耐腐蚀性能研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2020, 43(2): 42-47.
- Li J B, Zhou G X, Yang R T, et al. Microstructure and corrosion resistance of as-rolled Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2020, 43(2): 42-47 (in Chinese).
- [20] Wang P, Cai D Y. Preparation of graphene-modified anti-corrosion coating and study on its corrosion resistance mechanism[J]. *International Journal of Photoenergy*, 2020(3): 1-9.